

곡선교량-AGT 차량의 상호작용에 의한 동적 거동에 관한 연구

A Study on the Dynamic Interaction Analysis of Curved Bridge-AGT Vehicle

이안호*1)
Lee, An-Ho

김기봉**
Kim, Ki-Bong

김재민***
Kim, Jae-Min

ABSTRACT

This study is focused on the dynamic response of curved bridge when the rubber tired AGT vehicles is running with alternative articulations. For the analytic approach, there is necessary for the three dimensional vehicle model with 11 degree of freedom and the three dimensional curved bridge model by means of finite element method. It can be described by conventional Lagrangian formula with respect to the dynamic interactions between vehicles and its curved bridge. The formula is implemented by Fortran language on the simulation program designated BADIA II(Bridge-AGT Dynamic Interaction Analysis II). The solutions of the formula are derived by Newmark- β method. The BADIA II is for the dynamic interactions between vehicle and curved bridge in terms of the roughness of running surface and guide rail. The applicability of the BADIA II is verified in terms of displacement and modal frequency. This study is described that the dynamic interactive behaviors between the rubber tired AGT vehicle and curved bridge in terms of the radius of curvatures of curved bridge, vehicle articulations, vehicle speeds, vehicle weights, flatness of running surface and roughness of guide rail using BADIA II.

Keyword : Automated Guide-way Transit (AGT), Dynamic incremental factor, power spectrum density(PSD)

우리나라는 대도시의 교통문제를 해결하기 위하여 도로 및 철도 등 교통시설의 공급을 확대함과 동시에 버스전용차로의 확대 등 대중교통 우선 정책을 추진해오고 있다. 특히 승용차 이용수요에 직접적으로 대처할 수 있는 도로건설은 대도시에서 높은 용지보상비로 인하여 추진이 용이하지 않으며, 도로시설의 확충은 승용차 이용을 부추기는 결과를 가져와 급증하는 노면교통수요를 감당하기에는 역부족이다. 결국 대도시의 교통문제 해결을 위해서는 지하철 또는 전철과 같은 대량의 수송수단을 도입하여 급증하는 교통수요를 처리하여야 하나 지하철의 건설 또한 km당 700억 원 이상의 높은 투자비가 소요되어 재원조달에 많은 어려움이 있다. 따라서 기존 지하철에 비해 건설비 및 운영비가 저렴하고 건설이 비교적 용이하며 교통수요에 탄력적으로 대응할 수 있는 경량전철의 도입을 적극적으로 추진중에 있다. 아직 국내에선 고속전철에 비해 경량전철에 대한 연구가 시작단계라 할 수 있으며, 특히 경량전철은 도심에 기존 도로를 이용 고가로 건설할 경우가 많은데 이는 곡선교량 특히 R=100m 이하의 급곡선교량이 부득이 많이 계획된다. 또한 도심지에 건설되므로 구조물의 안전성을 해치지 않으며 경제적이고 외관이 수려한 구조물을 요구한다. 하지만 장경간의 수려한 구조(특히 곡선교)는 무엇보다 동적인 안전성이 취약한 구조이므로 이를 위한 정확한 구조해석을 통한 합리적인 설계 및 시공이 필요하다. 특히 구조물 위로 주행하는 차량과 교량의 상호 작용에 의한 곡선교량의 거동 규명은 교량 설계에 있어서 중요한 요인이 된다. 따라서 본 연구에서는 이를 종합적으로 동시에(상호작용 고려) 해석할 전용 프로그램의 개발과 상호작용에 의한 특성 분석을 수행하였다.

1. 서론

일반적으로 AGT라 함은 고가 위의 전용 궤도를 버스와 유사한 고무차륜을 부착한 차량이 자동

* 이안호 한국철도기술연구원 시스템기술개발팀 선임연구원
** 김기봉 중앙대학교 건설대학 토목공학과 정교수
*** 김재민 한국철도기술연구원 시스템기술개발팀 연구원

운전으로 운행하는 시스템을 말하며, 소음과 진동을 경감시킬 수 있어 고가로 도심을 통과시 적합한 시스템으로 평가된다. 하지만 아직까지 국내에서는 경량전철용 교량을 해석하기 위한 설계기준이 정립되어 있지 않고, 특히 차량 탈선의 위험이 많은 곡선교량의 동적해석을 위한 프로그램 및 해석방법(기준)이 없는 실정이다. 본 연구에서는 국내의 실정에 가장 적합하다고 평가되는 안내궤도식 자동운전 철도(AGT) 차량을 대상으로 하였으며, 대상 시스템은 도심지에 주로 고가로 건설되고 급곡선, 급구배 구간이 많은 특징이 있다. 따라서 곡선교량을 실제와 근접되게 해석 가능여부가 상당히 중요한 요소이다. 교량의 동적거동은 교량의 형식, 길이, 기본고유주기 등과 같은 교량의 동적특성 뿐만 아니라 차량의 주행속도, 기본고유주기, 제3계조의 조도, 그리고 주행면 및 가이드레일의 조도 등에 의해 영향을 받는다. 또한 동일한 차량도 모형화 기법에 따라 동적거동 특성이 상이하다. 따라서 본 연구에서는 횡방향 운동을 포함하는 11자유도 3차원 차량모델을 적용하여 주행노면 요철, 캔트 등을 고려할 수 있는 곡선교량(3차원)을 동시에 모델링하여 상호작용에 의한 동적거동 특성을 파악할 수 있는 전용프로그램(BADIA II : Bridge-AGT Dynamic Interaction Analysis II)를 개발하였다. 개발된 해석 프로그램을 이용 차량이 곡선부 통과시 원심력에 의한 횡하중 및 진동에 의한 영향 등을 실제 현상에 근접되게 적용할 수 있도록 연구하고자 한다. 특히 경량전철은 2량에서 6량까지 수송수요에 따라 다양한 편성이 가능하므로 이를 고려한 해석을 동시에 수행하였다. 아울러 본 연구의 결과로 주행로 표면 요철관리 한계, 가이드레일 요철관리 한계 등을 설정하고 제한속도 등을 고려한 최적의 주행조건을 제시할 수 있는 기초연구를 수행하고자 한다.



그림 1. 고무차륜형식 AGT(일본 KOMAKI)

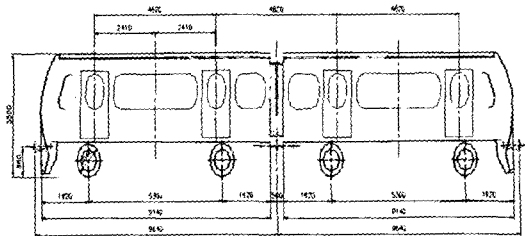


그림 2. 국내 개발 고무차륜 AGT 시스템

2. 수치 해석 모델

이 장에서는 곡선 교량과 AGT 차량의 동적 응답을 해석하기 위한 3차원 교량 및 차량 모델에 나타내었다. 해석에 사용된 교량은 경량전철 시험선 구간에 적용된 강합성 상자형 곡선 교량을 모델링 하였다. AGT 차량 모델은 외국의 AGT 차량과 트럭을 참고하였다.

도표 1 적용 파라메터

	CASE I	CASE II	CASE III
곡선 반경(R)	50m	100m	150m
차량 운행 대수(NV)	2	4	6
차량 중량(Wb)	1.63 kN	1.94 kN	-
노면 요철	고려시	비고려시	-
차량 주행속도	10km ~ 80km까지 5km/h씩 증가		

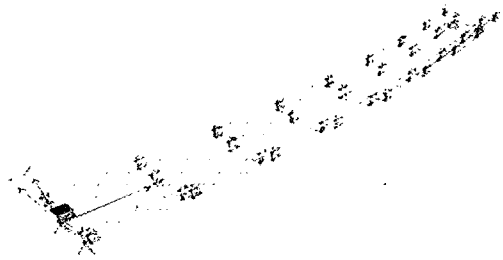


그림 3. 단순지지 강합성 상자형교 모델

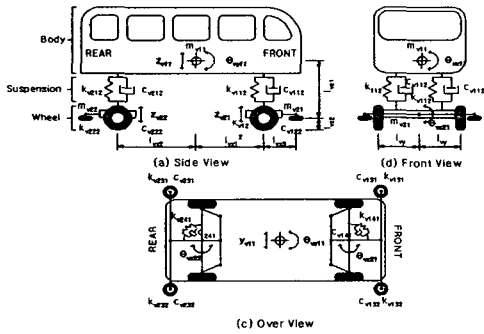


그림 4. AGT 차량 이상화 모델

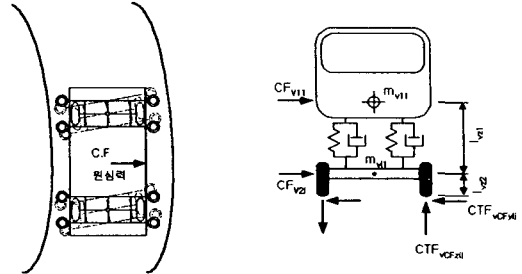


그림 5. 원심력을 고려한 AGT 차량 모델

그림 4와 5는 이상화된 AGT 차량 모델을 나타내는 것으로, 그림에서 m_{v11} 과 m_{w1i} 는 차체와 현가계 질량을 나타내고 k_{vimj} 와 c_{vimj} 는 각각 스프링 상수와 감쇠계수를 뜻하며 아래첨자 v는 차량 번호를, i는 차량의 전, 후 차축을 나타내는 것으로 i=1이면 앞 차축을, i=2이면 뒤 차축을 뜻하는 것이고 j는 좌, 우를 구분하는 첨자로 j=1이면 좌측을, j=2이면 우측을 뜻한다.

3. 노면 요철

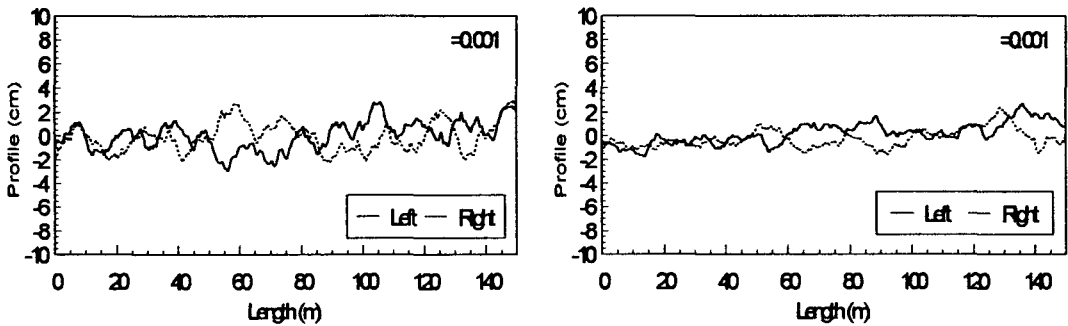
수치해석에 사용된 선로 및 안내 레일의 요철 프로파일은 power spectrum density(PSD) 함수에 기초하여 인위적으로 생성하였다. PSD 함수는 일반적으로 도로교의 교통에 의한 진동의 연구에 사용된다. 본 연구에서 사용된 PSD 함수는 다음 식과 같다.

$$S(\Omega) = \frac{\alpha}{(\Omega^n + \beta^n)}$$

여기서, α 는 노면 요철의 상태를 나타내는 변수, β 는 Ω 가 0일 때 PSD가 발산하는 것을 방지하는 변수이고 n 은 PSD 곡선의 강도나 기울기의 분포를 표현하는 변수이다.

일반적으로 β 값은 동적 응답에 대해 별다른 영향을 미치지 않는다. 따라서 본 연구에서는 승객의 승차감에 기초한 노면 요철의 ISO 기준에 근거하여 매우 평활(Very smooth)한 상태의 노면으로 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 α 와 β 값은 각각 0.001, 0.02이고 $n=2$ 값을 사용하였다.

그림 6은 시뮬레이션에 사용하기 위해 인위적으로 생성된 선로 및 안내 레일 노면 프로파일을 나타낸 것이다.



a) 선로 프로파일

b) 안내 레일 프로파일

그림 6. 노면 요철

4. 해석 프로그램 (BADIA II)

본 연구에서는 앞에서 구한 운동방정식에 해를 구하기 위해 Fortran 언어를 사용하여 프로그램 (BADIA II, Bridge-AGT vehicle Dynamic Interaction Analysis II)을 개발하였다. BADIA II는 횡방향 운동과 원심력을 고려할 수 있는 3차원 AGT 차량 모델과 3차원 교량 모델을 사용하여 교량-차량의 상호작용 그리고 노면 요철과 가이드레일 요철에 의한 차량과 교량의 동적 응답의 시뮬레이션이 가능하다. 교량과 차량 그리고 노면 요철에 의한 상호 작용 시뮬레이션이 가능하므로 교량의 동적 증가 계수(DIF)를 실험에 의하지 않고 시뮬레이션 할 수 있어 교량 설계 단계에 많은 도움을 줄 수 있고, 아울러 차량의 동적 응답 시뮬레이션을 통해 승차감의 평가도 가능하다. 노면 요철과 가이드레일 요철은 실측 자료를 사용하거나 또는 PSD 함수에 의해 랜덤하게 발생시킨 인공노면 요철을 사용할 수 있다. 곡선 주행시 차량에 발생하는 원심력은 곡선 반경과 차량 주행속도를 포함하는 함수를 사용하여 이에 대한 고려가 가능하다. 즉, 곡률반경과 주행속도에 따른 원심력을 자동으로 계산하여 그 원심력을 각 하륜에 수직, 수평방향 접지력으로 분배하여 계산한다. 동적 응답 시뮬레이션의 경우 수많은 반복 계산이 필요하므로 많은 계산시간이 소요된다. BADIA II에서는 계산 시간의 최소화를 위해 프로그래밍 시 Dynamic Allocation 기법, Normal Mode Method 그리고 Dynamic Condensation 기법들을 적용하였다. 그리고 방정식의 해는 직접적 분법인 Newmark- β Method를 사용하였다. 그림 7은 실험과 개발된 시뮬레이션 프로그램의 해석에 의한 차량의 동적 접지력 시간이력곡선을 비교하여 나타낸 것이다.

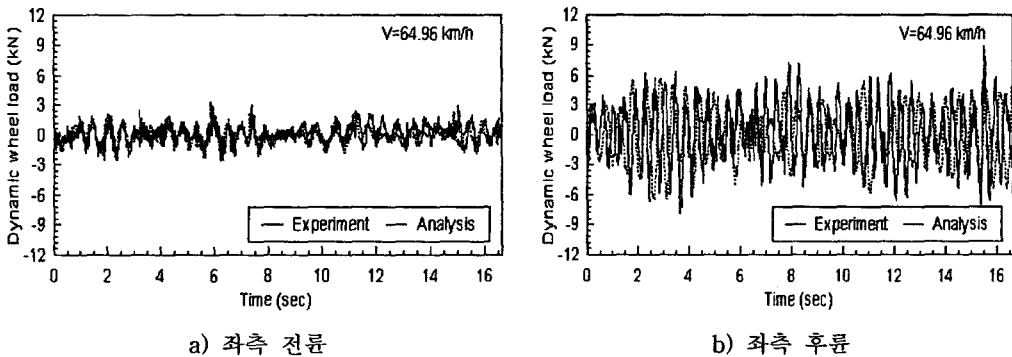


그림 7. 동적 차륜 하중의 비교

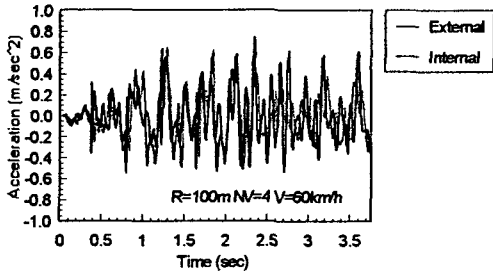
5. 교량의 동적 응답

1) 일반

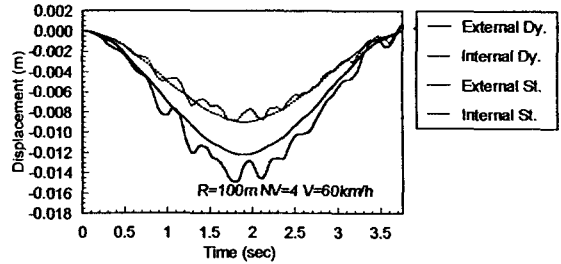
본 연구에서 사용된 교량 모델은 그림 3에서 보여진 바와 같이 단순지지된 강합성 상자형 교량으로 35m의 지간인 곡선교를 3차원 프레임 요소로 모델링하였다.

원래, 교량 변위는 차량이 교량에 정지해 있을 때보다 주행 중일 때 최고치를 나타낸다. 이것은 교량, 차량 및 노면 요철 때문에 기인한 것이다. 현장 시험을 제외하고 정적 및 동적 변위의 차를 계산한다는 것은 어려운 문제이다. 따라서 본 연구에서는 교량과 차량의 상호작용 시스템의 시뮬레이션을 이용하여 구할 수 있는 방법에 대하여 연구하였다.

대표적인 시뮬레이션 결과는 그림 8에 나타내었다. 그림 8(a)는 교량의 곡선 반경 $R=100m$ 이고 차량 주행속도가 60 km/hr, 차량 대수가 4일 경우의 지간 중앙의 대표적인 수직방향 가속도 응답을 나타낸 것이고 그림 8(b)는 마찬가지로 속도에 따른 대표적인 교량의 변위 시간 이력 곡선을 나타낸 것이다.



(a) 수직방향 가속도 응답



(b) 교량의 변위 시간 이력 곡선

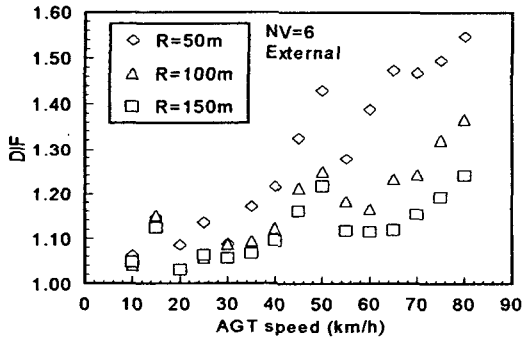
그림 8. 대표적인 시뮬레이션 결과

2) 교량의 동적증가계수(DIF)

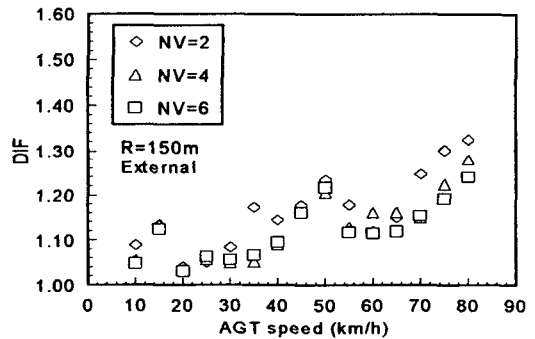
본 연구에서는, 차량 주행시 발생하는 교량의 동적 변이증가량의 비교를 위하여 동적 증가 계수(DIF : Dynamic Increment Factor)를 사용하였다. 여기서 DIF는 식 (2)에 표현된 것처럼 최대 정적 응답을 포함한 동적 응답의 최대 1주기 동안의 동적 및 정적 응답 사이의 절대 최대 차이 비로 정의된다.

$$DIF = \frac{|\Delta Y|_{\max}}{Y_{\text{static,max}}} + 1 \quad (2)$$

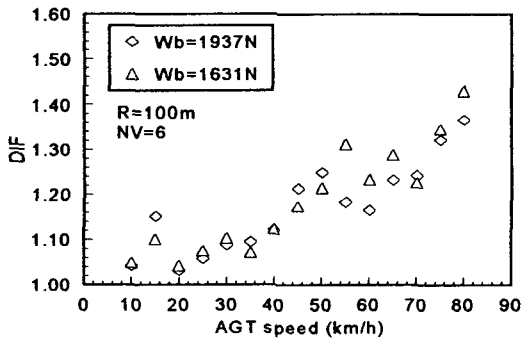
교량의 DIF를 주행 속도, 차량 대수, 곡선 반경 등의 영향을 고려하여 각 변수에 따른 DIF의 변화를 그림 9에 나타내었다.



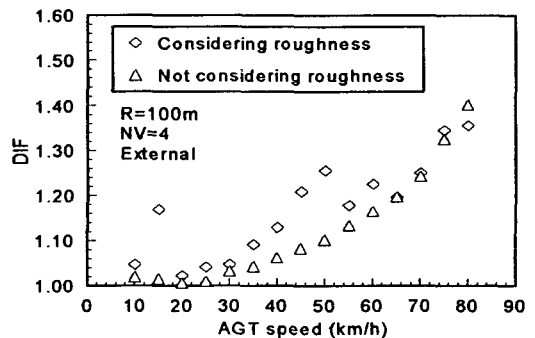
(a) 곡선 반경에 따른 외측의 동적증가계수



(b) 차량 대수에 따른 외측의 동적증가계수



(c) 차량 중량에 따른 외측의 동적증가계수



(d) 노면 요철에 따른 외측의 동적증가계수

그림 9. 교량의 동적응답계수

3) 교량의 가속도 응답

교량의 진동은 자체적으로는 물론 인근 구조물에도 해를 입히며 환경적인 문제를 야기할 수도 있다. 그러므로 AGT 교량과 같이 도심지에서는 특히 진동을 최소화하는 것이 상당히 중요하다. 본 연구에서는 차량운행 속도, 차량 대수 및 곡선 반경에 따른 교량의 가속도 응답에 대한 변화를 검토하였으며, 교량 가속도의 정량적 평가를 위하여 평균제곱근(RMS)을 사용하였다.

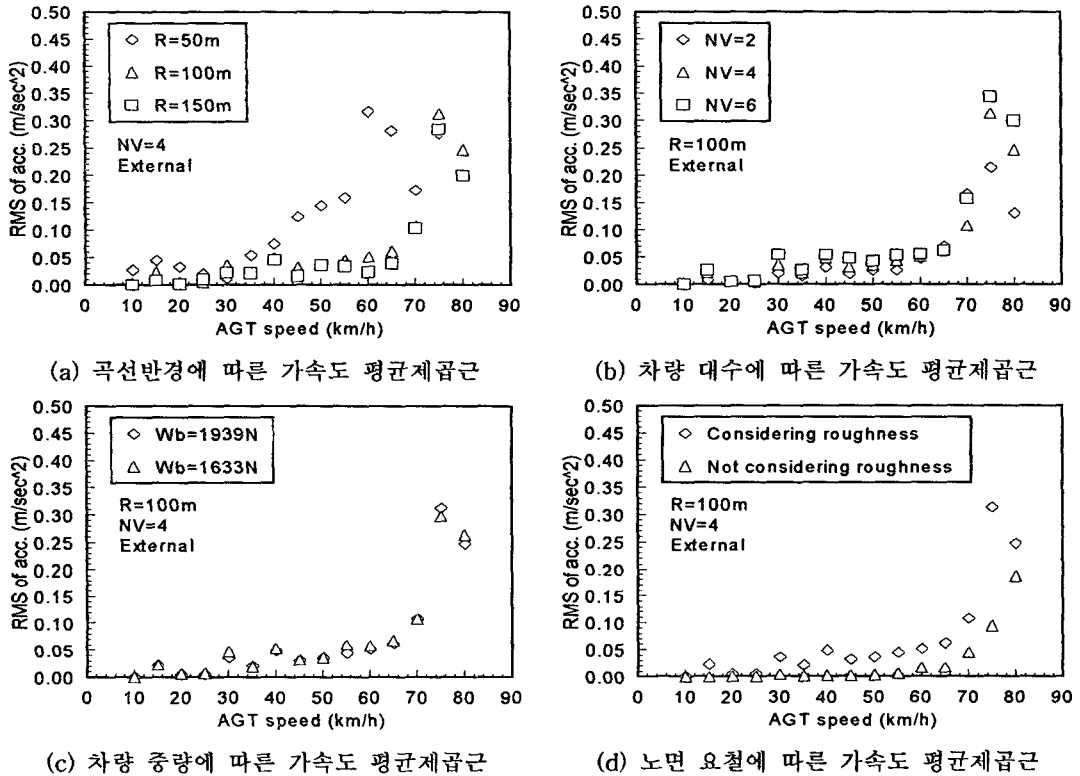


그림 10. 교량의 가속도 평균제곱근

6. 결론

본 연구에서는 곡선교량과 AGT 차량의 상호작용에 의한 동적 거동에 관한 연구를 수행하였다. 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 곡선 반경에 따른 교량의 동적증가계수(DIF)는 곡선반경에 반비례하여 동적증가계수가 증가하며 곡선반경에 관계없이 차량 주행속도가 증가할수록 전반적으로 DIF가 증가하는 경향을 보였다.
- (2) 동적증가계수(DIF)는 차량중량이 적은 경우가 더 큰 경향을 보이며 노면 요철을 고려한 경우가 노면요철을 고려하지 않은 경우에 비해 동적증가계수가 큰 값을 나타내었다.
- (3) 교량의 가속도 응답은 차량 주행속도가 증가함에 따라 전반적으로 상승하는 것으로 나타났으며 곡선반경에 관계없이 60km/hr 이상에서는 모두 크게 나타났다.

참고문헌

1. "경량전철 기술", 한국철도기술연구원, pp.1-4, 2001.
2. 송재필, "A Study on Dynamic Response Analysis and Vibration Serviceability of Bridge-AGT Vehicle Interaction System", 중앙대학교, 박사학위 논문, 2002.
3. Thomson, W. T., "Theory of Vibration with Applications," Prentice-Hall, pp.196-198, 1988.